

DOI: 10.7667/PSPC160250

基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度

王先齐, 吕智林, 汤泽琦

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对并网条件下的微网优化调度问题, 提出一种基于分时电价机制下的储能单元固定调度策略与可控微源动态优化调度相结合的微网运行调度方法。考虑系统功率平衡、失荷率及各种微源出力特性等主要约束, 将储能蓄电池充放电折旧成本和与电网能量交换成本-收益计入运行经济成本, 微网及电网侧发电污染物排放计入环境成本, 建立了并网型微网多目标动态优化调度模型。并采用基于 Tent 映射混沌种群初始化方法和 NDX 交叉算子产生子代的多目标遗传算法 NSGA-II 优化系统内部可控微源出力。最后以风/光/柴/燃/储并网型微网系统进行算例仿真, 验证所提模型合理性和求解方法的有效性。

关键词: 并网型微网; 分时电价机制; 调度策略; 动态优化调度; 改进 NSGA-II

Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism

WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi

(College of Electric Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: For the optimal dispatching problems of connected-microgrid, an operating dispatching method combining fixed dispatching strategy of energy storage unit and dynamic optimal dispatching of controlled microsource based on time-of-use (TOU) power price mechanism is proposed. Considering system constraints such as the power balance, loss of power supply probability as well as output characteristic of controlled microsource, this paper, reckoning the charging/discharging depreciation cost of storage batteries and the power exchanging cost/benefit between microgrid and power grid into operating economic cost, and pollutant emissions generated by the microgrid and power grid into environment harness cost, establishes a multiobjective dynamic optimal dispatching model. The improved multiobjective optimization genetic algorithm NSGA-II based on a tent maps chaos population initialization method and NDX crossover operator to product offspring is applied to optimize the output power of controlled microsource. Finally, taking a wind/PV/diesel/fuel-cell/battery hybrid grid-connected microgrid system for a simulation example, the rationality of the proposed model and effectiveness of the method are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61364027) and Natural Science Foundation of Guangxi Province (No. 2014GXNSFAA118384).

Key words: grid-connected microgrid; time-of-use power price mechanism; fixed dispatching strategy; dynamic optimal dispatching strategy; improved NSGA-II

0 引言

微网调度策略包括固定调度策略和优化调度策略两种, 其中优化调度策略可分为静态优化调度和动态优化调度^[1]。固定调度策略是在拟定设备运行

优先级和运行方式的基础上得到设备运行方案, 不随系统环境改变而变化; 静态优化调度是考虑各个时间断面内的目标最优, 易忽略各调度时段间系统状态的耦合关系, 具有短视性; 动态优化调度是基于整个调度周期(包含多个时段)寻求目标值最优的全局优化, 考虑各时段间的内在联系。

含储能单元的并网型微网无疑具有更高的供电可靠性^[1-2], 尤其是在电网故障孤立运行情况下, 储

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61364027); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118384)

能单元对提高用户侧供电可靠性起有关键作用。但考虑到微网中储能单元成本昂贵且使用寿命(充放电次数)有限,在并网情景下的蓄电池运行策略适宜采用一种以减少其充放电次数为目的的固定调度策略;而就微网自身而言,其含有发电机组、储能等多个具有时间耦合特性的单元,采用动态优化调度考虑了系统微源在多时段间的协调运行,具有更好的优化效果^[3-4]。

目前,国内已有部分文献对并网型微网优化调度问题展开了研究^[5-9]。文献[5]考虑各种微源约束条件,建立了以发电成本最低为优化目标的并网经济调度模型,并采用改进遗传算法进行求解,但没有考虑微网与电网的能量交换问题;文献[6]建立了基于分时电价机制的并网经济调度模型,尽管考虑了微网与电网电能交易对经济效益的影响,但其属于静态优化调度的范畴;文献[7-8]分别采用遗传算法和多目标进化算法对考虑经济性和环境性的微网系统进行优化调度,但未考虑储能单元循环充放电使用寿命折损问题;文献[9]考虑微网运行费用、电压偏差、微网削峰填谷能力,建立以综合指标值最高为优化目标的微网优化调度模型,但模型中未加入储能装置且采用权重法对不同属性指标的综合可能失去本身的物理意义。

本文以储能单元固定调度策略与可控微源动态优化策略相结合为主要思路,考虑微网对大电网削峰填谷而制定了基于分时电价机制的含蓄电池的并网微网运行调度策略,考虑系统供电可靠性水平,计及蓄电池充放电折旧成本和微网与电网能量交换成本收益,提出一种并网型微网多目标动态优化调度模型,并采用基于 Tent 映射混沌种群初始化方法和 NDX 交叉算子的多目标遗传算法 NSGA-II 算法求解模型。最后以风/光/柴/燃/储并网型微电网为例进行仿真,验证所建模型的合理性和所提方法的有效性。

1 微网动态优化调度模型

1.1 微网发电单元模型

1.1.1 光伏出力模型

光伏阵列(Photovoltaic Arrays, PV)系统输出功率可根据标准测试条件(Standard Test Condition, STC)下的输出功率和实际光照强度、环境温度计算^[8]。

1.1.2 风机出力模型

风机(Wind Turbines, WT)的输出功率与风机实际风速之间关系可近似为一个分段函数^[9],受风机自身参数(切入风速、切出风速、额定风速以及额定输出功率)有关。

1.1.3 燃料电池模型

本文采用质子交换膜类型燃料电池(Fuel Cell, FC),其作为一种清洁、高效的新型发电单元,能高效利用天然气进行发电,可作为微网系统主要调峰单元,则其燃料消耗-输出功率特性^[10]为

$$V_{FC} = \sum P_{FC} \Delta t / (\eta_{FC} \cdot LHV_g) \quad (1)$$

式中: V_{FC} 为天然气消耗量; Δt 为时间间隔; P_{FC} 为燃料电池输出功率; LHV_g 为天然气低位热值; η_{FC} 为燃料电池的效率。

1.1.4 柴油发电机模型

柴油发电机(Diesel Engine, DE)在微电网系统作为重要的调峰单元,其发电特性与传统发电机的能耗特性相似,可采用如式(2)二次函数模型^[11]表示。

$$V_{DE} = a(P_{DE})^2 + bP_{DE} + c \quad (2)$$

式中: V_{DE} 为柴油发电机耗油量; P_{DE} 为发电机输出功率。

1.1.5 蓄电池模型

蓄电池(Storage Battery, SB)作为储能单元,可吸纳微电网系统中不平衡功率,平抑负荷峰值,提高供电可靠性。假设蓄电池在各时段内充、放电功率恒定,不考虑环境温度对蓄电池工作状态的影响,SB在 t 时刻的荷电状态(State of Charge, SOC)与 $t-1$ 时刻 SOC 及自身充放电特性有关,其充、放电过程可描述^[12]如下。

放电过程

$$SOC_{SB}^t = SOC_{SB}^{t-1} (1 - r_{\text{self-dch}}) - P_{SB}^t \Delta t / \eta_{\text{dch}} C_{SB} \quad (3)$$

充电过程

$$SOC_{SB}^t = SOC_{SB}^{t-1} (1 - r_{\text{self-dch}}) - P_{SB}^t \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}} / C_{SB} \quad (4)$$

式中: Δt 为调度时段间隔; SOC_{SB}^t 为蓄电池 t 时段末的荷电状态; P_{SB}^t 为蓄电池在 t 时段蓄电池充放电功率,放电时为正,充电时为负; η_{ch} 为充电效率; η_{dch} 为放电效率; $r_{\text{self-dch}}$ 为蓄电池自放电率; C_{SB} 为蓄电池装机容量。

1.2 优化目标

目标1: 微网系统运行的经济成本最低

微网系统中风力、光伏发电不消耗燃料,应优先投运,其运行维护成本与环境因素有关,不予考虑;可控型微源的投资成本相对固定,不计入优化目标。经济成本主要考虑可控微源运行维护、燃料消耗、重启动成本、蓄电池充放电折旧成本和电网购售电成本收益,其中将微网余电上网收益作为经

济负成本计入到运行经济成本目标中, 则其表达式为

$$f_1 = \min \sum_{t \in T_{\text{sch}}} \left\{ \left(\sum_{i \in S_G} (C_{\text{Ma},i}^t + C_{\text{Fu},i}^t + C_{\text{St},i}^t) \right) + C_{\text{SB-dep}}^t + C_{\text{Grid}}^t \right\} \quad (5)$$

式中: T_{sch} 为一个调度周期的总时段数; S_G 为可控型微源总数目; $C_{\text{Ma},i}^t$ 、 $C_{\text{Fu},i}^t$ 和 $C_{\text{St},i}^t$ 分别为 t 时段内微源 i 的运行维护、燃料消耗和机组启动成本; $C_{\text{SB-dep}}^t$ 为 t 时段蓄电池充放电时产生的折旧成本; C_{Grid}^t 为微网与主电网能量交换成本。

$$\begin{cases} C_{\text{Ma},i}^t = U_i^t K_{\text{Ma},i} P_i^t \\ C_{\text{Fu},i}^t = U_i^t K_{\text{Fu},i} \cdot V_{\text{Fu},i}(P_i^t) \\ C_{\text{St},i}^t = U_{\text{St},i}^t K_{\text{St},i} \\ C_{\text{SB-dep}}^t = P_{\text{SB}}^t \cdot \delta(P_{\text{SB}}^t) \\ C_{\text{Grid}}^t = U_{\text{B}}^t p_{\text{B}}^t P_{\text{B}}^t - U_{\text{S}}^t p_{\text{S}}^t P_{\text{S}}^t \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i^t 为可控型微源 i 在时段 t 的输出功率; P_{SB}^t 为蓄电池充放电功率; P_{B}^t 、 P_{S}^t 分别为微网购、售电功率; U_i^t 、 $U_{\text{St},i}^t$ 、 U_{B}^t 、 U_{S}^t 均为[0-1]状态变量, U_i^t 为 t 时段内可控型微源 i 的工作状态($U_i^t=1$ 表示运行状态); $U_{\text{St},i}^t$ 为微源开启状态($U_{\text{St},i}^t=1$ 表示在 t 时刻启动运行); U_{B}^t 为 t 时段的微网购电标记($U_{\text{B}}^t=1$ 表示向大电网购电); U_{S}^t 为微网售电标记($U_{\text{S}}^t=1$ 表示向大电网售电); $K_{\text{Ma},i}$ 、 $K_{\text{Fu},i}$ 、 $K_{\text{St},i}$ 分别为微源 i 的运行维护、燃料价格、启动成本系数; $V_{\text{Fu},i}(P_i^t)$ 为微源 i 的燃料消耗量; p_{B}^t 和 p_{S}^t 分别为微网 t 时段向大电网购电单价和售电单价; $\delta(P_{\text{SB}}^t)$ 为设计的蓄电池充放电折旧系数。

目标2: 微网系统运行的环境成本最低

电网常规火力发电会产生大量污染性气体, 而微网中存在大量环境友好的发电单元, 因此合理安排微网各可控型微源出力、减少电网购电量是降低整体气排量的关键。本文环境成本主要考虑微网可控型微源发电和大电网火力发电污染物排放对环境的影响, 利用环境评估模型反映污染物排放对环境的影响, 其表达式为

$$f_2 = \min \sum_{t \in T_{\text{sch}}} \left(\sum_{i \in S_G} P_i^t \sum_{j \in J} v_{i,j} \alpha_j + P_{\text{B}}^t \sum_{j \in J} o_{\text{Grid},j} \alpha_j \right) \quad (7)$$

式中: J 为污染物种类数; $v_{i,j}$ 和 $o_{\text{Grid},j}$ 分别为可控型微源 i 和大电网单位发电量的污染物 j 排放量; α_j 为第 j 类污染物的环境治理成本, 见表1。

表1 污染物治理费用及排放系数

Table 1 Externality costs and emission factors

污染物种类	治污费用/(元/kg)	污染物排放系数/(g/kWh)				
		PV	WT	DE	FC	Grid
CO ₂	0.210	0	0	649.0	489.0	889.0
SO ₂	6.27	0	0	0.206	0.003	1.8
NO _x	26.46	0	0	9.890	0.010	1.6

1.3 系统约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i \in S_G} P_i^t + P_{\text{SB}}^t + U_{\text{B}}^t P_{\text{B}}^t - U_{\text{S}}^t P_{\text{S}}^t + P_{\text{Cut}}^t - P_{\text{Drop}}^t = P_{\text{L}}^t - P_{\text{PV}}^t - P_{\text{WT}}^t \quad (8)$$

式中: P_{PV}^t 和 P_{WT}^t 分别为光伏和风力在 t 时段的预测输出功率; P_{L}^t 为系统在 t 时段的负荷量; P_{Cut}^t 为系统在 t 时段的切负荷量(失荷量); P_{Drop}^t 为系统在 t 时段的弃电量。

2) 可控型微源输出功率约束

$$P_{i,\min} \leq P_i^t \leq P_{i,\max} \quad (9)$$

式中, $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为可控型微源 i 有功出力上限和下限。

3) 可控型微源爬坡率约束

$$-R_i^{\text{down}} \Delta t \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq R_i^{\text{up}} \Delta t \quad (10)$$

式中: P_i^{t-1} 为微源 i 在 $t-1$ 时段的有功出力; R_i^{up} 和 R_i^{down} 分别为其最大爬坡上升率和下降率。

4) 可控型微源启停时间约束

$$\begin{cases} U_{\text{St},i}^t + \sum_{l=1}^{L_{\text{St},i}} (1 - U_i^{t-L_{\text{St},i}+l-1}) \leq 1 \\ U_{\text{Sp},i}^t + \sum_{l=1}^{L_{\text{Sp},i}} U_i^{t-L_{\text{Sp},i}+l-1} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $L_{\text{St},i}$ 和 $L_{\text{Sp},i}$ 分别为可控型微源 i 最小连续启动时间长度和最小连续停机时间长度; $U_{\text{Sp},i}^t$ 为微源停机状态变量($U_{\text{Sp},i}^t=1$ 表示在 t 时刻停机)。

5) 蓄电池运行约束

考虑到过充或过放均会影响蓄电池使用寿命, 考虑对蓄电池充、放电深度进行限制和放电功率进行约束:

$$SOC_{\text{SB},\min} \leq SOC_{\text{SB}}^t \leq SOC_{\text{SB},\max} \quad (12)$$

式中: $SOC_{\text{SB},\min}$ 和 $SOC_{\text{SB},\max}$ 分别为蓄电池的荷电状态下限值和上限值。

在蓄电池充放电过程中, 其所允许最大充放电功率受蓄电池本身特性以及当前时段初始荷电状态

有关, 在 t 时段由蓄电池荷电状态限制的最大充电功率 $P'_{\text{SOC-limit,ch}}$ 和放电功率 $P'_{\text{SOC-limit,dch}}$ 分别为

$$P'_{\text{SOC-limit,ch}} = [\text{SOC}_{\text{SB,max}} - (1 - r_{\text{self-dch}}) \text{SOC}_{\text{SB}}^{t-1}] C_{\text{SB}} / (\Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}) \quad (13)$$

$$P'_{\text{SOC-limit,dch}} = [(1 - r_{\text{self-dch}}) \text{SOC}_{\text{SB}}^{t-1} - \text{SOC}_{\text{SB}}^{\min}] C_{\text{SB}} \cdot \eta_{\text{dch}} / \Delta t \quad (14)$$

蓄电池充电时, 充电功率约束为

$$-\min\{P_{\text{SB-N,ch}}, P'_{\text{SOC-limit,ch}}\} \leq P'_{\text{SB}} \leq 0 \quad (15)$$

蓄电池放电时, 放电功率约束为

$$0 \leq P'_{\text{SB}} \leq \min\{P_{\text{SB-N,dch}}, P'_{\text{SOC-limit,dch}}\} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{SB-N,ch}}$ 和 $P_{\text{SB-N,dch}}$ 分别为蓄电池的额定充电和放电功率限制, 均取蓄电池最大容量的 20%^[13]。

微网的调度具有周期性特征, 本文假设蓄电池组在一个调度周期内始末时刻荷电状态保持一致, 即满足调度周期性约束:

$$\text{SOC}_{\text{SB}}^{24,\text{end}} = \text{SOC}_{\text{SB}}^{1,\text{ini}} \quad (17)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{SB}}^{1,\text{ini}}$ 和 $\text{SOC}_{\text{SB}}^{24,\text{end}}$ 分别为 SB 在一个调度周期内的初始时刻和终止时刻荷电状态。

6) 微网与大电网传输联络线容量约束

$$|U_{\text{S}}^t P_{\text{S}}^t - U_{\text{B}}^t P_{\text{B}}^t| \leq P_{\text{line,max}} \quad (18)$$

式中, $P_{\text{line,max}}$ 为微网与大电网间联络线允许的最大传输功率。规定在同一调度时段内微网不能同时向大电网购电和售电, 即满足购、售电状态互斥约束:

$$U_{\text{B}}^t + U_{\text{S}}^t \leq 1 \quad (19)$$

7) 系统失荷率约束

$$\begin{cases} \lambda_{\text{LPSP}} \leq \lambda_{\text{LPSP}}^{\max} \\ \lambda_{\text{LPSP}} = \sum_{t \in T_{\text{sch}}} W'_{\text{LPSP}} / \sum_{t \in T_{\text{sch}}} P'_{\text{L}} \Delta t \end{cases} \quad (20)$$

式中: λ_{LPSP} 表示并网型微网系统的失荷率(Loss of Power Supply Probability, LPSP), 用来表征并网微网的供电可靠性; $\lambda_{\text{LPSP}}^{\max}$ 为其允许的最大失荷率值; 在 t 时段系统负荷完全满足时, W'_{LPSP} 为 0, 反之则为 $W'_{\text{LPSP}} = P'_{\text{Cut}} \Delta t$ 。

1.4 微网运行约束处理方法

并网型微电网动态调度模型的约束条件可分为微源模型约束和系统运行约束条件, 并采用硬约束方法、柔性约束方法和降维约束方法处理这些约束条件, 其具体说明如下。

1) 硬约束处理方法。针对微源模型出力技术限制对应的输出功率约束条件, 如可控型微源输出功率约束式(9)、蓄电池荷电状态约束式(12)、蓄电池充放电功率约束式(15)和式(16)以及微网与大电网传输联络线容量约束式(18), 当功率量低于或超出

对应约束范围下界或上界时, 将该功率量置为约束条件下边界或上边界值。

特殊情况下, 如可控型微源爬坡率约束式(10)中当前时段微源的出力范围是以上一个时段出力功率为基准确定的, 可控型微源启/停时间约束式(11)中需考虑微源前数个时段的工作状态才能确定其当前时段微源启/停状态变化。

2) 柔性约束处理方法。系统运行约束通常与整个调度周期内微源的工作状态有关, 具有较强的耦合性, 如蓄电池始末 SOC 周期性约束式(17)、微网 LPSP 约束式(20), 该类约束条件一旦不满足就很难确定相关功率量的调整方式, 因此可采用柔性约束处理方法, 在该约束式不满足情况下将一种外惩罚函数计入到目标函数 $F(X)$ 来诱导产生满足约束式(17)和式(20)的可行解。

$$\begin{cases} \tilde{F}(X) = F(X) + \varepsilon_1(\text{SOC}) + \varepsilon_2(\lambda_{\text{LPSP}}) \\ \varepsilon_1(\text{SOC}) = \omega_1 |\text{SOC}_{\text{SB}}^{24,\text{end}} - \text{SOC}_{\text{SB}}^{1,\text{ini}}| \\ \varepsilon_2(\lambda_{\text{LPSP}}) = \omega_2 s_{\lambda}(t - \lambda_{\text{LPSP}}) / \lambda_{\text{LPSP}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: X 为决策向量; $\varepsilon_1(\text{SOC})$ 为蓄电池 SOC 周期性约束外惩罚函数; $\varepsilon_2(\lambda_{\text{LPSP}})$ 为系统失荷率约束外惩罚函数; $s_{\lambda}(t - \lambda_{\text{LPSP}})$ 为以 λ_{LPSP} 为分段点的阶跃函数; ω_1, ω_2 分别为对应惩罚函数系数。

3) 降维约束处理方法。由于系统功率平衡约束式(8)中包含可控型微源出力功率、蓄电池充放电功率和微网与电网交换功率等多个功率变量, 本文采用降维约束处理方法, 将蓄电池充放电功率和微网与电网交换功率作为因变量, 其数值由系统功率平衡约束式及其运行调度策略共同确定。蓄电池充放电功率和微网与电网交换功率调度策略在后续小节具体说明。

2 并网型微网优化调度策略

对并网模式下的微网进行日前动态优化调度, 将日调度周期分为 24 个调度时段, 每一个调度时段取 1 h, 按照峰时段微网多售电、谷时平时尽量多购电的原则, 先安排各时段系统内的可控微源输出功率, 然后根据系统功率平衡和结合具体的调度策略确定蓄电池充放电功率及微网与电网的交换功率。图 1 给出了微网蓄电池和电网功率交换的运行调度策略, 微网与电网间电能交换采用分时电价机制, 并根据电网日常用电规律将全天划分为谷时、平时和峰时 3 种时段, 其中谷时段为 00:00—7:00, 平时段为 8:00—10:00、16:00—18:00 和 22:00—23:00, 峰时段为 11:00—15:00 和 19:00—21:00。该调度策略首先对全日各时段微网风、光伏有功出力以及系

统负荷功率进行预测, 并监测蓄电池在每个调度时段的初始荷电状态 SOC_{SB}^t 。图 2 给出了蓄电池在整个调度周期的状态变化, 蓄电池在调度谷时段 00:00—07:00 充分吸收微网富余的电能及其电网低价的电能, 同样在平时段 8:00—10:00 充电或保持, 为

后面峰时段 11:00—15:00 放电做好准备, 避免峰时段高价购电。蓄电池利用电网谷时的低电价进行充电, 然后电网峰时尽可能放电, 其全天状态变化次数基本固定, 不仅提高了微网本身的经济效益, 兼顾了提高蓄电池利用率 and 使用寿命。

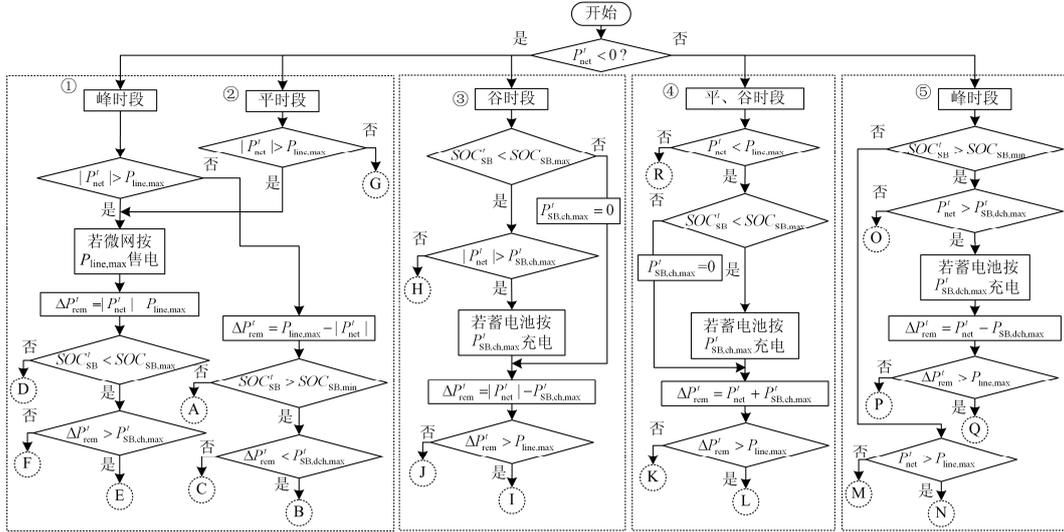


图 1 蓄电池充放电和电网交换功率调度策略流程图

Fig. 1 Dispatching strategy flowchart of SB charging/discharging power and grid exchanging power

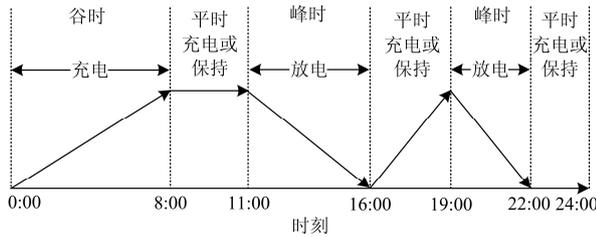


图 2 蓄电池全天运行状态图

Fig. 2 Running state diagram of battery in a day

图中 P_{net}^t 表示当前时段系统负荷功率经风、光可再生能源发电和可控型微源出力削减后的净负荷功率, 即 $P_{net}^t = P_L^t - P_{WT}^t - P_{PV}^t - \sum P_i^t$, 当 $P_{net}^t < 0$ 时表示微网满足系统负荷需求仍存在过剩电能, 可由蓄电池吸收或出售给大电网; $P_{net}^t > 0$ 时表示不满足系统负荷需求, 由蓄电池补充不足功率或从电网购电补充。依据分时电价机制可将如图 1 所示的调度策略分为 5 个分支: 1) 在系统风、光和可控型微源总出力超出系统负荷并处于峰时段情况下 (即 $P_{net}^t < 0$), 微网应尽量售电。若系统富余功率不足 $P_{line,max}$ (微网与电网间传输联络线容量限制), 蓄电池尽量放电, 微网尽可能按 $P_{line,max}$ 售电; 若系统富余功率超过 $P_{line,max}$, 超出部分给蓄电池充电, 微网

按 $P_{line,max}$ 售电。2) $P_{net}^t < 0$ 且处于平时段, 蓄电池充电或保持。若系统富余功率不足 $P_{line,max}$, 微网按富余功率售电; 若系统富余功率超过 $P_{line,max}$, 超出部分给蓄电池充电, 微网按 $P_{line,max}$ 售电。3) $P_{net}^t < 0$ 且处于谷时段, 优先利用 $|P_{net}^t|$ 对蓄电池充电, 若仍有富余, 则微网尽量按 $P_{line,max}$ 售电。4) 在系统风、光和可控型微源总出力不足系统负荷并处于平、谷时段时 (即 $P_{net}^t > 0$), 向电网购电补充不足功率同时尽可能给蓄电池充电。5) $P_{net}^t > 0$ 且处于峰时段, 蓄电池尽量放电补充不足功率, 若仍有缺额, 则转向电网购电补充。A~R 表示微网各种运行情况下的调度命令: A 表示蓄电池保持, 微网按 $|P_{net}^t|$ 售电; B 表示蓄电池按 ΔP_{rem}^t 放电, 微网按 $P_{line,max}$ 售电; C 表示蓄电池按 $P_{SB,dch,max}^t$ 放电, 微网按 $(|P_{net}^t| + P_{SB,dch,max}^t)$ 售电; D 表示蓄电池保持, 微网按 $P_{line,max}$ 售电, 多余 ΔP_{rem}^t 弃电; E 表示蓄电池按 $P_{SB,ch,max}^t$ 充电, 微网按 $P_{line,max}$ 售电, 多余 $(\Delta P_{rem}^t - P_{SB,ch,max}^t)$ 弃电; F 表示蓄电池按 ΔP_{rem}^t 充电, 微网按 $P_{line,max}$ 售电; G 表示蓄电池保持, 微网按 P_{net}^t 售电; H 表示蓄电池按 $|P_{net}^t|$ 充电; I 表示蓄电池按 $P_{SB,ch,max}^t$ 充电, 微网按 $P_{line,max}$ 售

电, 多余 $(\Delta P'_{rem} - P_{line,max})$ 弃电; J 表示蓄电池按 $P'_{SB,ch,max}$ 充电, 微网按 $\Delta P'_{rem}$ 售电; K 表示蓄电池按 $P'_{SB,ch,max}$ 充电, 微网按 $\Delta P'_{rem}$ 购电; L 表示蓄电池按 $(P_{line,max} - |P'_{net}|)$ 充电, 微网按 $P_{line,max}$ 购电; M 表示蓄电池保持, 微网按 P'_{net} 购电; N 表示蓄电池保持, 微网按 $P_{line,max}$ 购电, 供电不足 $(P'_{net} - P_{line,max})$ 切负荷; O 表示蓄电池按 P'_{net} 放电; P 表示蓄电池按 $P'_{SB,dch,max}$ 放电, 微网按 $\Delta P'_{rem}$ 购电; Q 表示蓄电池按 $P'_{SB,dch,max}$ 放电, 微网按 $P_{line,max}$ 购电, 供电不足 $(\Delta P'_{rem} - P_{line,max})$ 切负荷; R 表示蓄电池保持, 微网按 $P_{line,max}$ 购电, 供电不足 $(P'_{net} - P_{line,max})$ 切负荷。

3 求解方法及流程

3.1 改进 NSGA-II 的求解算法

传统的 NSGA-II 主要贡献在于提出非支配度排序法、拥挤距离计算和精英保留策略, 其遗传算法仍然采用传统遗传的算法, 在可行域复杂时易陷入局部最优^[14]。为了适应本文模型求解得到 Pareto 最优解集, 对 NSGA-II 算法进行如下改进: 1) 引入 Tent 混沌映射对种群进行混沌初始化; 2) 采用正态交叉算子 NDX 进行交叉操作。最后采用模糊隶属函数^[15]计算各 Pareto 解的综合隶属度值(满意度), 比较得到最大满意度的解方案, 即为并网型微网多目标动态优化调度的最优折衷解方案(本文赋予经济和环境目标权重系数均为1)。

3.1.1 Tent 混沌映射

Tent 映射属于一种分段性映射, 其映射结构简单, 具有均匀概率密度、功率谱密度和遍历性等特点, 本文利用其混沌遍历性对种群进行初始化, 提高个体多样性, 其数学表达式为

$$T(z_n) = \begin{cases} 2z_n, & 0 \leq z_n \leq 0.5 \\ 2(1-z_n), & 0.5 < z_n \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中, z_n 为第 n 次混沌迭代点。需要注意 Tent 迭代序列中仍存在不稳定的周期点, 例如 0.25, 0.50, 0.75, ... 均为迭代不动点, 此时可利用小值扰动使序列跳出该类不动点, 从而重新进入混沌状态, 则修正 Tent 映射表达式^[16-17]为

$$z_{n+1} = \begin{cases} T(z_n) + 0.1 \cdot rand(0,1) \\ z_n = 0, 0.25, 0.50, 0.75, \dots \\ T(z_n) \text{ 其他} \end{cases} \quad (23)$$

根据式(23)对种群中每个染色体均产生一个混沌序列 β , 将产生的混沌序列映射到决策变量取值

范围, 则第 i 个染色体 x 的第 j 维分量可表示为

$$x_{i,j} = x_{i,j}^{\min} + (x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}) \cdot \beta_{i,j} \quad (24)$$

3.1.2 正态分布交叉 NDX 算法

NSGA-II 算法的交叉操作采用 SBX 算子^[18]模拟二进制交叉过程, 因其搜索范围有限, 易陷入局部最优解。为提高算法空间搜索能力, 引入正态分布交叉 NDX 算子^[19], 其交叉方程表达式为

$$\begin{cases} y_{1,j} = (x_{1,j} + x_{2,j})/2 \pm 1.481 \times |N(0,1)| (x_{1,j} - x_{2,j})/2, u \leq 0.5 \\ y_{2,j} = (x_{1,j} + x_{2,j})/2 \mp 1.481 \times |N(0,1)| (x_{1,j} - x_{2,j})/2, u > 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $x_{1,j}$ 和 $x_{2,j}$ 分别为交叉选择的两个父代染色体的第 j 维分量; $y_{1,j}$ 和 $y_{2,j}$ 为交叉产生的两个子代染色体的第 j 维分量; u 满足(0,1)均匀分布; $N(0,1)$ 为符合标准正态分布的随机数。

3.2 改进 NSGA-II 算法实现流程(图 3)

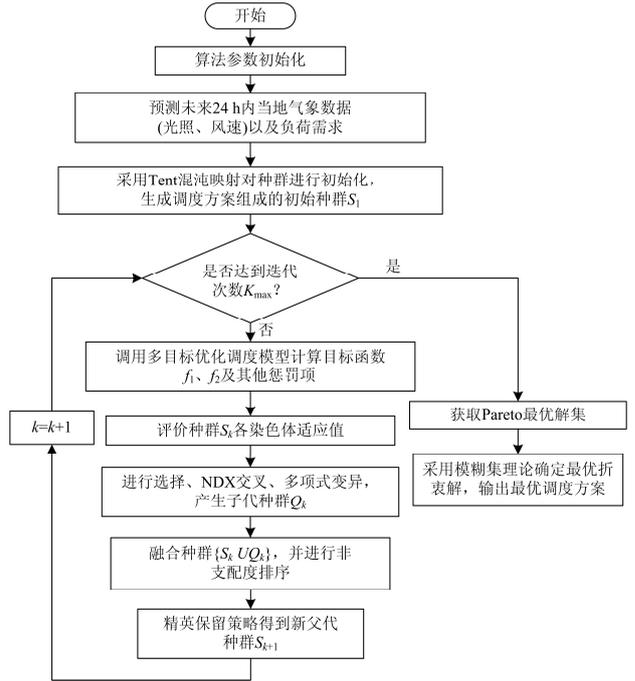


图 3 改进 NSGA-II 算法优化流程图

Fig. 3 Optimization flowchart of improved NSGA-II algorithm

4 算例分析

为分析验证所提并网型微网多目标动态优化调度模型的合理性及改进算法的有效性, 本文采用风/光/柴/燃/储并网型微网系统, 包含 100 kW 光伏、300 kW 风机、80 kW 柴油发电机组、80 kW 燃料电池以及 200 kWh 容量储能蓄电池, 其中蓄电池充、放电效率分别为 93%和 92%, 初始荷电状态为 0.5,

荷电状态上、下限分别为 0.9 和 0.3, 天然气价格为 2.28 元/m³, 柴油价格为 7.59 元/kg, 柴油发电机与燃料电池出力技术参数见表 2, 系统允许最大失荷率 $\lambda_{LSP}^{\max} = 0$ 。假设微网系统贴近用户端, 不考虑输电线路损耗和系统内部损耗, 且优先利用风、光输出对负荷进行削减。

表 2 各种微源技术参数

电源类型	技术	运行维护		最小连	最小连	开机启	输出功率爬坡率	
		系数/(元		续运行	续停机	动费	限制/kW	
		下限	上限	/kWh	时间/h	时间/h	用/元	上升率
DE	6	80	0.0859	1.5	2.0	3.0	120	140
FC	4	80	0.0310	2.0	2.0	4.0	120	160

以未来 24 h 内的风、光、负荷预测数据(如图 4)作为系统仿真输入, 采用改进 NSGA-II 算法对系统进行日前动态优化调度, 取 24 h 各时段柴油发电机和燃料电池的输出功率作为优化变量:

$$X = [P_{DE}^1, P_{DE}^2, \dots, P_{DE}^{24}, P_{FC}^1, P_{FC}^2, \dots, P_{FC}^{24}] \quad (26)$$

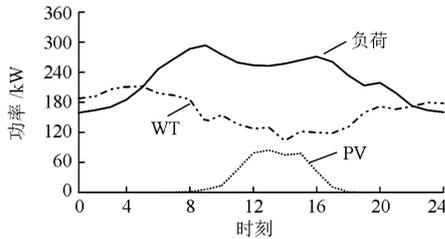


图 4 风力、光伏和负荷日预测功率曲线

Fig. 4 Predicted power curves of WT, PV and load in a day

根据前面所提降维约束处理方法, 将蓄电池充放电功率 P_{SB}^i 和微网购电功率 P_S^i 、 P_B^i 作为因变量处理, 其数值由功率平衡约束式(8)与图 1 所示调度策略共同决定。微网与电网之间的购售电价采用分时定价机制, 具体见表 3。

表 3 购电与售电电价

购售电	价格/(元/kWh)		
	谷时段	平时段	峰时段
购电	0.43	0.69	1.21
售电	0.27	0.50	1.02

改进 NSGA-II 算法相关参数设置: 种群规模为 100、最大迭代次数 $K_{\max} = 2000$ 、个体交叉概率为 0.9、变异概率为 0.1。

4.1 改进 NSGA-II 算法性能分析

本文分别采用改进 NSGA-II 算法^[20-21]对微网动态优化调度模型进行求解, 得到如图 5 所示的 Pareto 解集分布, 从图中可以看出相比于常规 NSGA-II,

改进 NSGA-II 算法较 NSGA-II 获取的 Pareto 解集分布更加平滑、均匀, 且解的质量更高。图 6 给出了两种算法迭代过程中保留 Pareto 解集(精英策略)的折衷解收敛变化情况, 从图中可以看出当迭代次数增加到一定次数时, Pareto 解集的折衷解满意度值趋于不变, 说明算法基本收敛, 通过比较两条收敛曲线可明显看出改进 NSGA-II 算法优化收敛速度更快、算法鲁棒性更好, 能够为微网动态优化调度问题提供高质量的解方案, 保证微网运行的经济效益和环境效益。

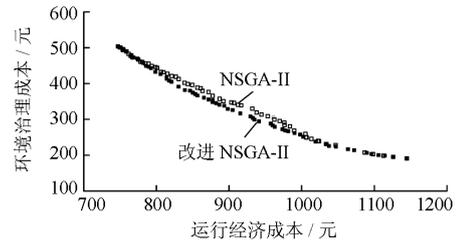


图 5 不同 NSGA-II 算法优化得到的 Pareto 解分布

Fig. 5 Distribution of Pareto solution obtained by different NSGA-II algorithms

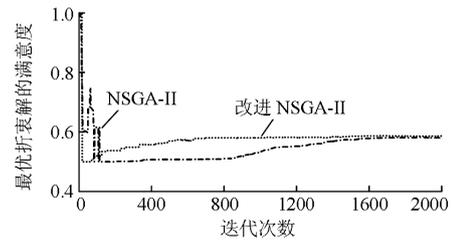


图 6 NSGA-II 和改进 NSGA-II 算法折衷解收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of compromise solution with NSGA-II and improved NSGA-II

4.2 不同目标 Pareto 解下的调度结果分析

图 7 给出了 3 种目标 Pareto 解对应的优化结果。图 7(a)为经济成本最低对应的调度方案, 其中 DE 作为主要的出力单元, 其发电量占负荷总量的 19.70%, 而 FC 仅占 3.37%, 微网在峰时段以联络线最大允许功率向电网高价售电提高经济收益, 而在平、谷时段利用电网低价电能尽量对 SB 充电, 以便其在峰时段放电, 尽量降低发电成本较高的 FC 输出功率, 使得运行经济成本最低, 但其环境成本较最低环境成本值高出 163.6%; 图 7(b)为环境治理成本最低对应的调度方案, 其中 FC 作为主要的出力单元, 其发电总量占负荷总量的 15.86%, 而 DE 仅占 2.12%; 由表 1 可知 FC 发电环境性最优, 而 DE 和电网发电的环境性较差, 因此需减少 DE 出力及尽量避免向电网购电使得环境成本最低, 但其运行

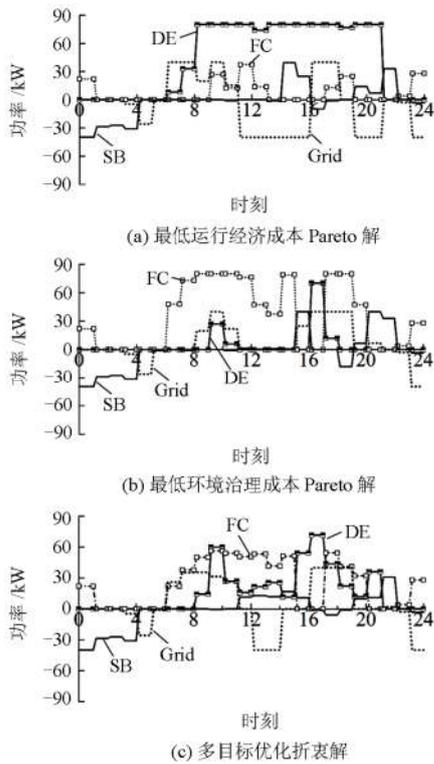


图 7 不同 Pareto 解对应的动态调度方案

Fig. 7 Dynamic dispatching scheme of different Pareto solutions

经济成本较最低经济成本值高出53.23%；图7(c)是综合考虑微网经济效益和环境效益的一种折衷调度方案，其中 DE 发电量占7.62%，FC 发电量占11.01%，其对应的经济成本较最低经济成本值高出26.00%，环境成本较最低环境成本值高出53.99%，表明折衷方案对经济、环境目标值均有不同程度的改善，其中环境目标具有更大的改善空间。

图8给出3种 Pareto 解对应的 SB 的 SOC 变化曲线，从图中可以看出3种目标 Pareto 解对应的 SOC 在一个调度周期的变化趋势大体一致：SB 均在(前日)24:00—03:00时段保持充电至 SOC 上限0.9，在 04:00—10:00时段荷电保持，在11:00—15:00时段分别放电至0.548、0.649和0.656，在16:00—18:00时段

充电，19:00—21:00时段放电，在22:00—23:00时段充电，24:00时段继续充电至初始状态0.5，SB 在整个调度周期内充放电次数有限，达到了延长使用寿命的目的。

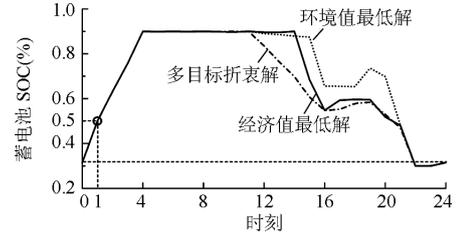


图 8 不同目标 Pareto 解下的蓄电池 SOC 变化曲线

Fig. 8 SOC changes curves of SB under different objective Pareto solutions

传统权重法处理多目标是将多目标优化问题转化为一个综合单目标优化问题(其中经济、环境目标权重系数各为1)。本文采用基于3.1节改进策略的单目标遗传算法对权重法处理后的多目标模型进行10次模型仿真，如图9给出了10次优化结果(对应10个综合目标最优解)，从图中可看出基于权重法的综合目标值跨度范围较大，且集中在 Pareto 最优折衷解的周围，优化效果差(见表4)。权重方法处理多目标优化问题时不再依赖优化子目标本身，而是寻找一个综合目标值较大的解，这样往往加大了搜索最优解的难度，且每一次只能找到一个最优解，具有局限性。而基于 Pareto 解的多目标优化算法每一次获取的 Pareto 最优解集相对稳定，最终折衷解也相对集中。

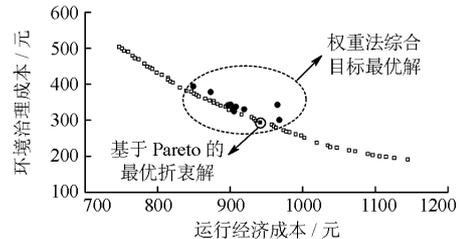


图 9 不同多目标优化处理方法对应的最优解

Fig. 9 Optimal solution with different multi-objective optimization processing methods

表 4 不同多目标处理方法的动态优化调度结果

Table 4 Dynamic optimal dispatching results of different Pareto solutions

多目标问题 处理方法	优化解类型	运行经济 成本/元	环境治理 成本/元	各种污染物日排放量/kg			售电收 益/元	售电总 量/kWh	购电成 本/元	购电总 量/kWh	弃电总 量/kWh	微网负 荷率(%)
				CO ₂	SO ₂	NO _x						
基于 Pareto 解	最优经济目标	747.08	503.42	994.543	0.645	10.979	315.56	354.42	141.65	235.44	0	95.67
基于 Pareto 解	最优环境目标	1144.75	190.96	704.375	0.447	1.521	29.96	74.42	177.82	233.77	0	95.70
基于 Pareto 解	满意度折衷目标	941.35	293.65	807.715	0.585	4.549	111.56	154.42	175.94	276.56	0	94.92
权重法	综合目标	967.70	300.66	826.428	0.500	4.687	162.02	228.43	144.32	224.21	0	95.88

(微网负荷率定义为一个调度周期内微网自供给负荷总电量与负荷总需求量的比值。)

如图10、图11分别给出不同目标类型 Pareto 解对应的运行经济成本和环境治理成本的分布情况, 表明本文所建多目标优化模型不仅能保证系统供电可靠性和可再生能源的充分利用, 同时能较好地协调经济与环境之间的平衡, 实现经济环保电力调度。

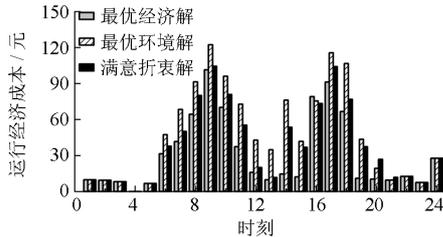


图 10 不同 Pareto 解对应的运行经济成本

Fig. 10 Operating economic cost of different Pareto solutions

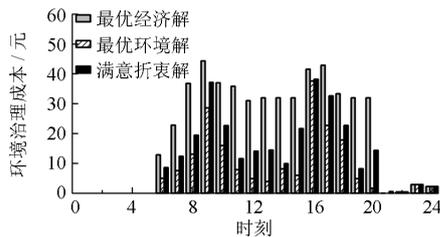


图 11 不同 Pareto 解对应的环境治理成本

Fig. 11 Environment harness cost of different Pareto solutions

5 结论

本文以蓄电池固定调度策略与可控微源动态优化调度策略相结合为主要思路, 提出基于分时电价机制的含蓄电池的并网微网运行调度策略的多目标动态优化调度模型, 应用基于 Tent 映射混沌种群初始化方法和 NDX 交叉算子的改进 NSGA-II 算法求解模型得到 Pareto 解集, 最后应用模糊理论选择最优折衷方案。算例仿真验证了改进 NSGA-II 算法求解多约束、多目标复杂优化问题的可行性, 多目标动态优化调度兼顾经济效益和环境效益进行全局范围搜索, 可为决策者提供权衡系统经济成本与环境成本之间关系的多个高质量可行解; 同时表明所提优化调度策略不仅可对电网实现削峰填谷, 同时兼顾蓄电池使用寿命实现经济环境优化调度。

参考文献

[1] 宋旭东, 张晓平, 余南华, 等. 考虑分布式能源接入的配电网规划及其关键技术综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 38-43, 87.
SONG Xudong, ZHANG Xiaoping, YU Nanhua, et al. A review of distribution network plan considering the access of DG and its key technologies[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 38-43, 87.

[2] 段秦刚, 邓应松, 王子力. 用户侧微电网技术经济评价研究综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 58-62.
DUAN Qingang, DENG Yingsong, WANG Zili. Probe into user side micro-grid technological economic evaluation study[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 58-62.

[3] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.

[4] 杨冬峰, 周苏荃, 魏剑啸, 等. 基于MPC的超短期优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 21-26.
YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, WEI Jianxiao, et al. Ultra-short term optimal dispatch method based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 21-26.

[5] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.

[6] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.

[7] MOGHADDAM A, SEIFI A, NIKNAM T, et al. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with backup micro-turbine /fuel cell/battery hybrid power source[J]. Energy, 2011, 36(11): 6490-6507.

[8] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.

[9] 杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 等. 采用 PSO-BF 算法的微电网多目标电能优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 43(13): 14-20.
YANG Yi, LEI Xia, XU Guiyang, et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm[J].

- Power System Protection and Control, 2014, 43(13): 14-20.
- [10] EI-SHARKH M Y, RAHMAN A, ALAM M S, et al. Thermal energy management of a CHP hybrid of wind and a grid-parallel PEM fuel cell power plant[J]. Power Systems Conference and Exposition, 2009: 1-6.
- [11] YING Yihong, RUO Chenlian. Optimal sizing of hybrid wind/PV/diesel generation in a stand-alone power system using Markov-based genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 640-647.
- [12] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Power Sources, 2001, 96(1): 113-120.
- [13] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50. CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [14] DOS L, COELHO S, ALOTTO P. Multiobjective electromagnetic optimization based on a nondominated sorting genetic approach with a chaotic crossover operator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1078-1081.
- [15] REZVANI A, GANDOMKAR M, IZADBAKHS M, et al. Environmental/economic scheduling of a micro-grid with renewable energy resources[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 216-226.
- [16] 张浩, 张铁男, 沈继红, 等. Tent 混沌粒子群算法及其在结构优化决策中的应用[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 857-862. ZHANG Hao, ZHANG Tienan, SHEN Jihong, et al. Research on decision-makings of structure optimization based on improved Tent PSO[J]. Control and Decision, 2008, 23(8): 857-862.
- [17] 王瑞琪, 张承慧, 李珂. 基于改进混沌优化的多目标遗传算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1391-1397. WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke. Multi-objective genetic algorithm based on improved chaotic optimization[J]. Control and Decision, 2011, 26(9): 1391-1397.
- [18] JEYADEVI S, BASKAR S, BABULAL C K, et al. Solving multiobjective optimal reactive power dispatch using modified NSGA-II[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 219-228.
- [19] 陈志旺, 陈林, 白铎, 等. 求解约束多目标区间优化的交互多属性决策 NSGA-II 算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 865-870. CHEN Zhiwang, CHEN Lin, BAI Xin, et al. Interactive multi-attribute decision-making NSGA-II for constrained multi-objective optimization with interval numbers[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 865-870.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] 叶青, 朱永强, 李红贤. 基于改进遗传算法电力系统仿真软件间模型参数转换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 95-100. YE Qing, ZHU Yongqiang, LI Hongxian. Model parameter conversion between power system software based on IGA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 95-100.

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-04-10

作者简介:

王先齐(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制; E-mail: wxq_20150612@163.com

吕智林(1971-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为智能电网、系统优化及复杂系统集成控制等; E-mail: luzhilin2001@163.com

汤泽琦(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制。E-mail: tangzqxx@163.com

(编辑 周金梅)